

**Atas das Comunicações das 6as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
e das 1as Jornadas de Proteção Civil**

**Editores: João Paulo Correia Rodrigues
António Moura Correia
Cristina Calmeiro dos Santos**

**Primeira edição
novembro, 2018**

Copyright © 2018 João Paulo C. Rodrigues

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita do editor.

ISBN: 978-989-96461-9-3

Edição:

ACIV – Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil

RESISTÊNCIA TERMOMECAÂNICA EM REGIME ESTACIONÁRIO DE PROVETES DE TERRA COMPRIMIDA

Diogo Lima
Aluno
IPB - Bragança

Edgar Soares
Aluno
UM – Guimarães

Débora Ferreira¹
Professora
IPB - Bragança

Luís Mesquita
Professor
IPB - Bragança

Tiago Miranda
Professor
UM – Guimarães

Dinis Leitão
Professor
UM – Guimarães

SUMÁRIO

O trabalho desenvolvido baseia-se num conjunto de ensaios experimentais de resistência à compressão em provetes cilíndricos de terra compactada. Cinco amostras com diferentes percentagens de estabilizante, cal e cimento, em relação a diferentes patamares de temperatura foram analisadas. É objetivo deste estudo comparar o comportamento dos provetes e compreender a influência dos estabilizadores e da temperatura na sua resistência mecânica. Os ensaios a temperaturas elevadas são realizados em regime estacionário. Os resultados permitem aferir qual a melhor mistura, ao nível do desempenho, considerando a resistência máxima, comportamento mecânico, economia e sustentabilidade. Após a análise dos resultados, a composição M2 com 5.0% cal e 7.5% cimento apresenta-se como a melhor opção. Adicionalmente, é analisada a resistência residual dos provetes da amostra M2 após exposição a temperaturas elevadas.

PALAVRAS-CHAVE: Provetes de terra comprimida; resistência ao fogo; resistência residual.

1. INTRODUÇÃO

A construção em terra está presente em várias partes do mundo, principalmente devido à disponibilidade e facilidade da terra como material da construção. A data exata em que surgiram as primeiras construções em terra não é conhecida, porém, estima-se que tenha surgido de uma forma natural através da necessidade básica do ser humano de se proteger do clima, animais e pessoas. Atualmente a construção em terra continua a ser usada principalmente em países em desenvolvimento e estima-se que cerca de um quarto da população mundial habite numa construção em terra demonstrando a relevância deste tipo de construção, [1].

A terra é um recurso natural disponível praticamente em todo o mundo e o seu uso é praticado por populações locais, pelo que a construção em terra está conotada à arquitetura vernacular. Isto significa também que a variabilidade existente entre solos e os diferentes enquadramentos sociais, culturais e económicos destas populações resultam numa grande diversidade de técnicas construtivas tradicionais. Apesar disto, a alvenaria de adobe e a construção em taipa são geralmente distinguidas como as técnicas mais populares, [2].

¹ Débora Ferreira – Instituto Politécnico de Bragança, Departamento de mecânica aplicada, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 BRAGANÇA, Portugal. Email: debora@ipb.pt

Atualmente, a construção em terra é cada vez mais reconhecida e aceite como alternativa à construção dita convencional, devido à sua elevada sustentabilidade, bom desempenho térmico e acústico, elevada resistência ao fogo e baixo custo do material, [3]. Contudo, o maior obstáculo ao recurso à construção em terra prende-se com o facto destes materiais (terra) em geral não serem considerados materiais normalizados. A grande variabilidade e heterogeneidade das propriedades da matéria-prima (solo), e processos construtivos sem controlo de qualidade podem ser apontados como os principais fatores desta situação. Além disto, os materiais de terra são associados a baixas resistências mecânicas, ao fraco desempenho sísmico das construções e falta de durabilidade à ação da água. Em geral, estas ideias levam a uma fraca aceitação da construção em terra em países desenvolvidos, onde este tipo de construção também é erradamente associado a uma construção de subsistência e à pobreza.

A necessidade de se adotarem soluções construtivas mais sustentáveis na indústria da construção tem levado ao melhoramento dos materiais de terra e dos respetivos processos construtivos. A construção em alvenaria de blocos de terra comprimida (BTC) é provavelmente o caso mais relevante deste melhoramento, onde este tipo de construção pode ser visto como uma modernização da alvenaria de adobe. Os BTC são produzidos com recurso a prensas, onde a terra húmida é compactada estaticamente num molde específico para formar o bloco, que é imediatamente desmoldado e posto a secar. Este processo permite uma uniformização da geometria dos BTC e um aumento considerável da sua densidade, relativamente a unidades de adobe, promovendo uma resistência mecânica bastante superior. Os BTC podem ser obtidos por meio de uma prensa manual ou com recurso a prensas hidráulicas cuja pressão de compactação é superior, e portanto, permitem BTC com melhores propriedades mecânicas, [4]. Esta técnica construtiva tem ganho alguma popularidade em países como Alemanha, Austrália, Brasil, Espanha, França, Índia, Nova Zelândia e Zimbabué, onde é utilizada como forma de construção sustentável de baixo custo e onde de facto existem algumas recomendações e normas aplicáveis [5, 6, 7, 8, 9].

A estabilização química por adição de cal ou cimento é outra forma de melhoramento comum no processo de fabrico de BTC, especialmente no caso de o solo disponível não apresentar características adequadas. A sua estabilização visa sobretudo a melhoria das suas propriedades mecânicas e a manutenção das suas características ao longo do tempo (durabilidade). A estabilização química é feita com a introdução de componentes (ligantes) nos solos que resulta na melhoria da sua resistência e diminuição da sua suscetibilidade às variações de humidade. Dos diversos produtos químicos utilizados para a estabilização, o cimento é o utilizado de forma mais generalizada. Esta solução construtiva é menos atrativa do ponto de vista económico e ambiental. A estabilização através da ativação alcalina de cinza volante em aplicações geotécnicas, [10, 11] e construção em taipa [12] é um tema que tem sido estudado recentemente, e que tem como objetivo diminuir o impacto ambiental da estabilização química convencional neste tipo de aplicações.

Os Bloco de Terra Comprimida (BTC) são incombustíveis, não exalam gases tóxicos e por isso os produtos da combustão não são prejudiciais à saúde humana. São maus condutores de calor (possui baixa condutividade térmica a temperatura ambiente). Estas características concedem ao BTC uma boa reação ao fogo, [13].

A deterioração do BTC, sujeito a temperaturas elevadas, manifesta-se de forma desconhecida, modificando o seu comportamento conforme o estabilizante contido na sua composição. O aquecimento do BTC conduz à degradação diferencial afetando as propriedades mecânicas, resistência e módulo de elasticidade, conforme a temperatura a que for exposto. Há perda de rigidez podendo originar o colapso dos elementos estruturais, tanto na fase de aquecimento como na fase de arrefecimento.

O trabalho desenvolvido é sobre a segurança das construções em Bloco de Terra Comprimida (BTC) quando sujeitas a situações de incêndio. Os resultados da resistência obtidos pelos BTC, a temperaturas elevadas e após arrefecimento, são analisados tendo como principal objetivo aumentar o conhecimento e, assim, garantir a segurança dos bens e principalmente das pessoas. A amostra com melhor desempenho a temperaturas elevadas foram realizados ensaios de compressão residual, [14,15]. A realização de ensaios em paredes construídas em BTC será objeto de estudo posterior.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Construção dos provetes de ensaio

Para a realização dos ensaios cerca de 100 provetes cilíndricos com as dimensões de 70x140 mm foram concebidos. Os provetes foram produzidos com solo residual granítico (SRG) típico do norte de Portugal, recolhido da localidade de Louredo em Guimarães e as suas propriedades foram analisadas em termos de granulometria [16] limites de consistência [17], baridade seca máxima e teor ótimo em água [18]. O solo apresenta percentagem de finos insuficiente, especialmente no que diz respeito à argila, cuja percentagem é de cerca de 4%. De uma percentagem de argila tão baixa espera-se problemas no processo de fabrico, nomeadamente na obtenção de uma coesão inicial dos BTC para a sua desmoldagem e manuseamento imediatos. O valor obtido para o teor ótimo em água foi de cerca de 12% e para a baridade seca máxima foi de cerca de 1,71 g/cm³, o que também indica que os BTC fabricados com o solo natural poderão apresentar resistência mecânica insuficiente. Assim, verifica-se a inadequabilidade do SRG recolhido para o fabrico de BTC no seu estado natural, pelo que estabilização química é necessária. A estabilização do solo foi feita com cal e cimento [19], ver Figura 1.



Figura 1: Execução dos provetes cilíndricos.

2.2 Procedimento dos ensaios à compressão

O programa experimental foi dividido em duas partes. Na primeira fase de ensaios, os provetes foram divididos em 5 percentagens diferentes de estabilizantes, cal e cimento. Para cada composição foram utilizadas 18 amostras, sendo ensaiadas 3 amostras de cada composição por diferentes patamares de temperatura. No Quadro 1 estão identificadas as diferentes composições e no quadro 2 os diferentes patamares de temperatura ensaiados, o primeiro patamar P0 é referente à temperatura ambiente [14].

Quadro 5: Composição de cada mistura estudada em (%)

Amostra	Solo	Cal	Cimento
M1	90	5	5
M2	87.5	5	7.5
M3	87.5	7.5	5
M4	85	7.5	7.5
M5	80	10	10

Quadro 2: Patamares de temperatura de ensaio em (°C)

Identificação	Temperatura
P0	20
P1	100
P2	200
P3	400
P4	600
P5	800

Os ensaios foram realizados num forno fixado na base a uma máquina de ensaios universal, Instron® 4485, adaptada para funcionar à compressão, Figura 2. As temperaturas foram medidas com dois termopares. O primeiro termopar era utilizado para controlo e monitorização da temperatura da amostra, enquanto o segundo era posicionado na envolvente da amostra para medir a temperatura do ar dentro do forno, Figura 3. Um controlador PID foi utilizado para controlar o aumento e a temperatura pretendida da amostra, dando-se início ao ensaio 15 minutos após a obtenção da temperatura pretendida, com o objetivo de se obter toda a amostra à mesma temperatura.



Figura 2: Forno fixado na base do sistema de ensaios mecânicos da série Instron® 4485.

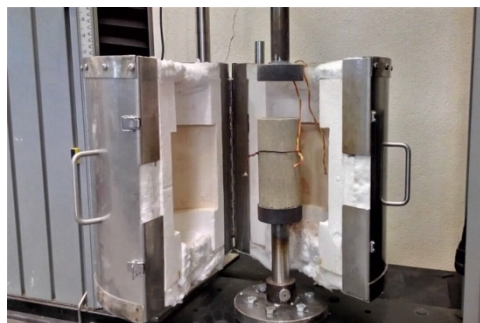


Figura 3: Localização dos termopares.

Na segunda fase de ensaios, designada por ensaios de compressão residual (ECR), foi analisado o comportamento mecânico à compressão do provete após exposição a temperaturas elevadas e deixado arrefecer naturalmente durante 24 horas até atingir a temperatura ambiente. Para estes ensaios apenas foram usados provetes com a composição “M2” uma vez que foi a composição que obteve os melhores resultados nos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário. Os provetes são sujeitos às temperaturas identificadas no Quadro 2.

3. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Na Figura 4 são apresentados os resultados dos ensaios compressão residual da amostra M2. A amostra “M2” foi selecionada devido à obtenção dos melhores resultados na primeira fase de ensaios.

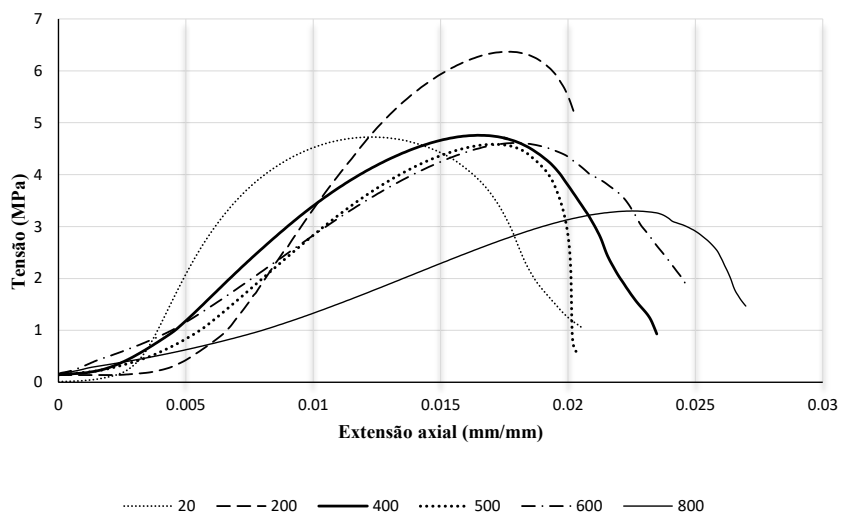


Figura 4: Relação tensão (MPa) versus extensão axial (mm/mm) para a amostra M2 para os ensaios de compressão residual.

Os ensaios compressão residual tiveram como principal objetivo demonstrar o comportamento mecânico da amostra M2 após uma situação de incêndio, ou seja, após ter sido submetida a elevadas temperaturas e deixada arrefecer e só então é que os provetes foram ensaiados.

No Quadro 3 são apresentados os valores da tensão máxima do ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário e do ensaio de compressão residual da amostra M2. Nos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário os provetes obtiveram maior tensão de compressão entre 400°C e 600°C. Assim sendo foi realizado um ensaio adicional no ensaio de compressão residual no patamar de temperatura igual a 500°C.

Quadro 1: Tensão máxima à compressão em regime estacionário e tensão máxima de compressão residual (ECR) da amostra M2 (MPa)

Temperatura	M2	M2 (ECR)
20°C	4.864	4.864
100°C	4.369	- - - -
200°C	5.018	6.638
400°C	8.011	4.758
500°C	- - - -	4.583
600°C	7.149	4.608
800°C	5.986	3.300

Em comparação com os ensaios da primeira fase pode observar-se um melhor desempenho da amostra M2 quando submetida a 200°C. Após o patamar de temperatura de 400°C verifica-se um desempenho 50% menor, demonstrando a influência da temperatura na mudança da resistência do material após exposição a altas temperaturas e deixado arrefecer até à temperatura ambiente.

Os ensaios de compressão residual em comparação com os ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário mostram que a exposição até aos 200°C traz um aumento da sua capacidade resistente à compressão após o arrefecimento da amostra. Porém acima desta temperatura a resistência mecânica dos provetes altera e o seu desempenho e a resistência à compressão diminuiu, como se pode verificar nos ensaios de compressão residual.

Em resumo, observa-se que os provetes apresentam uma resistência antes de serem submetidos a altas temperaturas diferente da resistência obtida quando submetidos a temperaturas elevadas e ensaiados à compressão. A sua resistência à compressão acima dos 600°C diminui. Mas quando comparados com os provetes sujeitos a temperaturas elevadas e deixados arrefecer, a partir de 200°C a sua resistência diminui. Também se verifica uma alteração da cor das amostras quando expostas a estes níveis de temperatura. Revela-se de extrema importância o estudo dos ensaios de compressão dos BTC bem como o seu comportamento em caso de incêndio.

4. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido permitiu analisar e avaliar o comportamento do BTC e a sua resistência para diferentes percentagens de estabilizantes quando submetidos a diferentes temperaturas. Foi possível concluir que a composição M2 com 5.0% de cal e 7.5% de cimento apresenta uma resistência próxima da composição M5 com 10% de cal e 10% de cimento, sendo a M2 a melhor escolha devido à menor quantidade de estabilizantes, é uma solução mais económica e mais sustentável.

Nos ensaios de resistência termomecânica em regime estacionário, para diferentes patamares de temperatura, concluiu-se que o BTC se comporta, em geral, de uma forma melhor até uma temperatura de 400°C, atingindo o valor máximo da sua resistência.

Nos ensaios de compressão residual, os provetes são submetidos a altas temperaturas e só após 24 horas é realizado o ensaio de compressão. A amostra M2 tem uma perda significativa da resistência a partir de 200°C, demonstrando que em caso de incêndio ou exposição a altas temperaturas, é necessário tomar precaução e realizar um reforço na alvenaria devido a modificações negativas que os materiais sofrem após voltarem à temperatura ambiente causando uma perda de resistência no BTC. Por exemplo, no ensaio de compressão residual da amostra M2, obteve-se uma resistência de rotura próxima 4.7 MPa, porém, no ensaio realizado enquanto a amostra estava submetida a 400°C, a sua resistência foi de aproximadamente 8.0 MPa, um valor bastante inferior.

A principal preocupação dos órgãos normativos com a ocorrência de incêndio não está ligada ao interesse de preservar o património, mas sim de garantir que a estrutura permaneça com sua capacidade portante preservada, por um período de tempo considerado suficiente para garantir o combate ao incêndio e a total evacuação das pessoas. Em suma, pode-se afirmar que o BTC obteve um aumento da resistência quando submetido a temperaturas maiores que 400°C, dando a segurança necessária em caso de incêndios.

Através dos resultados de resistência à compressão atingida em blocos de terra comprimida antes, durante e após o incêndio, consegue-se perceber o comportamento de estruturas em BTC quando sujeitas a situações, aumentando assim a segurança das pessoas e dos bens. Também foi possível analisar a melhor composição e quantidade de estabilizante com o intuito de colocar a economia e a sustentabilidade em primeiro lugar.

REFERÊNCIAS

- [1] Varum, H.; Velosa A. – *Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro*. Seminário Ibero-Americano de construção em terra, 2005.
- [2] Houben, H. e Guillaud, H. – *Earth Construction: A Comprehensive Guide*, CRATerre – EAG. Intermediate Technology Publication, London, 2008. ISBN 978-1-85339-193-4.
- [3] Pacheco-Torgal, F. e Jalali, S. – *Earth construction: lessons from the past for future eco-efficient construction*. Construction and Building Materials, 29, 2012, p. 512-519.
- [4] Gomes, I. – *Construção sísmo-resistente em terra crua*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [5] NZS 4297: New Zealand Standard – *Engineering design of earth buildings*, 1998.
- [6] NZS 4297: New Zealand Standard – *Materials and workmanship for earth buildings*, 1998.
- [7] NZS 4297: New Zealand Standard – *Earth buildings not requiring specific design*, 1998.
- [8] UNE 41410: AENOR – *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques – Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*, 2008.
- [9] Standards Australia, HB 195 – *The Australian earth building handbook*, Walker, P. and Standards Australia. Austrália. 2002.
- [10] Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., Teixeira Pinto, A. – *Effect of calcium content on soil stabilisation with alkaline activation*. Construction and Building Materials, 29, 2012a p. 167-174.
- [11] Cristelo, N.M., et al. – *Soil Stabilisation using Alkaline Activation of Fly Ash for Self Compacting Rammed Earth Construction*. Construction and Building Materials, 36, 2012b, p. 727-735.
- [12] Silva, R.A., et. al. – *Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal*. Construction and Building Materials, 47, 2013, p. 181-191.
- [13] Ferreira, D.M., et al. – *Behaviour of non-loadbearing tabique wall subjected to fire – Experimental and numerical analysis*. Journal of Building Engineering, 2017. 9: p. 164-176.
- [14] Edgar Soares, et al. – *Fire Behaviour of Compacted Earth Blocks*. REHABEND 2018. Euro-American Congress. Construction Pathology, Rehabilitation Technology and Heritage Management, 15-18 May, Cáceres, Spain, 2018.
- [15] Lima, D.P.d. – *Ensaio de resistência termomecânica em regime estacionário em Bloco de terra compactada (BTC)*, tese de mestrado em Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- [16] LNEC E196: *Análise granulométrica*, LNEC 1996.
- [17] NP 143 – *Solos: determinação dos limites de consistência*. LNEC 1969.
- [18] LNEC E 197: *Ensaio de compactação*, LNEC 1997.
- [19] Silva, R. A., et al. – *Caraterização do comportamento ao corte de alvenaria de blocos de terra compactada com junta seca*. 9º Congresso Nacional de Mecânica Experimental Aveiro, 15-17 de Outubro, 2014.